第 37 卷第 20 期
2017 年 10 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol.37,No.20
Oct.,2017

DOI: 10.5846/stxb201608021590

姚旭,景航,梁楚涛,谷利茶,王国梁,薛莲.人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应.生态学报,2017,37(20):6724-6731.

Yao X, Jing H, Liang C T, Gu L C, Wang G L, Xue S.Response of labile organic carbon content in surface soil aggregates to short-term nitrogen addition in artificial *Pinus tabulaeformis* forests.Acta Ecologica Sinica,2017,37(20):6724-6731.

人工油松林表层土壤团聚体活性有机碳含量对短期氮添加的响应

姚 旭[1],景 航[1],梁楚涛[2],谷利茶[2],王国梁[1,2,*],薛 莲[1,2]

1 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

2 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

摘要:大气氮沉降正在显著影响着森林生态系统的土壤碳循环过程。目前关于大气氮沉降如何影响土壤不同粒级团聚体内活性有机碳含量还不是十分清楚,制约人们对森林土壤碳循环的认识和有关碳循环模型的发展。通过近 2 年的林地梯度氮添加(0、3、6、9 g N m^{-2} a^{-1})实验,研究了短期氮添加对人工油松林表层土壤团聚体中不同活性有机碳含量的影响。结果表明:短期氮添加对表层土壤(0—10 cm)水稳性团聚体分布无显著影响;随着氮添加水平增加,大、微团聚体有机碳含量,大、微团聚体中活性和高活性有机碳含量呈先升高后降低的变化规律,并在 N6 处理(6 g N m^{-2} a^{-1})下上述各指标达到最大;同一处理下土壤大、微团聚体活性有机碳含量都表现为高活性有机碳>中活性有机碳>低活性有机碳;相比 CK 处理,N6 处理大团聚体低、中、高活性有机碳含量分别增加 115.06%、178.73%和 79.61%,微团聚体低、中、高活性有机碳含量增加 32.84%、166.79%和 62.05%。大、微团聚体中活性有机碳含量增幅最大,表明团聚体中活性有机碳对氮添加响应最为明显。研究发现,短期氮添加主要通过影响表层大、微团聚体中的中活性有机碳进而影响土壤表层有机碳含量。主成分分析表明,N 添加改变了土壤理化性质,进而导致根系生物量增加并促进凋落物分解,是表层土壤团聚体活性有机碳变化的主要原因。

关键词:氮沉降;土壤团聚体;活性有机碳;油松

Response of labile organic carbon content in surface soil aggregates to short-term nitrogen addition in artificial *Pinus tabulaeformis* forests

YAO Xu[1], JING Hang[1], LIANG Chutao[2], GU Licha[2], WANG Guoliang[1,2,*], XUE Sha[1,2]

1 *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling* 712100, *China*

2 *Institute of Soil and water Conservation, Chinese Academy of Science and Ministry of Water Resources, Yangling* 712100, *China*

Abstract: Increasing nitrogen (N) deposition is significantly affecting the carbon cycle in forest ecosystems. However, it is not clear how N deposition affects the content of labile organic carbon in soil aggregates, which restricts our understanding of the soil carbon cycle and the development of the carbon cycle model. This study was conducted in an artificial *Pinus tabulaeformis* forest and simulated N deposition for nearly 2 years. Three N treatments, namely, N3 (3 g N m^{-2} a^{-1}), N6 (6 g N m^{-2} a^{-1}), and N9 (9 g N m^{-2} a^{-1}), and a control treatment with no N added were applied, and each was replicated six times. Three labile organic carbon in soil aggregates were measured. There was no significant effect of short-term N addition on surface soil aggregates, while soil organic carbon was dramatically affected by N addition. Soil organic carbon content in the 0—10 cm soil layer was higher in the three N addition treatments and was highest in the N6 treatment.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41371508);中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-306-2)

收稿日期:2016-08-02; **网络出版日期:**2017-06-01

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: glwang@nwsuaf.edu.cn

Additionally, the change in organic carbon content in macro- and micro-aggregates generally followed the pattern of soil organic carbon, and moderately, highly labile organic carbon also followed. In soil aggregates, the amount of highly labile carbon was greatest, then moderately labile carbon, and the content of minimally labile carbon was lowest. Compared to three labile organic carbon of CK treatment, the amount of minimally, moderately, and highly labile organic carbon in the N6 treatment increased by 115.06%, 178.73%, and 79.61% in macro-aggregate, respectively. And the amount of three labile organic carbons in the micro-aggregate increased by 32.84%, 166.79%, and 62.05%, respectively. Among the three labile organic carbon categories, the change of moderately active organic carbon in the macro- and micro-aggregates was highest, which indicated that the moderately active organic carbon in soil aggregates was the most sensitive to short-term N addition. The results showed that short-term N addition affected surface soil organic carbon content by changing the amount of moderately labile organic carbon in the surface soil macro- and micro-aggregates. The results of a principal components analysis showed that soil total N and pH were affected by short-term N addition and it also caused a change in soil texture and total P. The changes of soil physical and chemical properties may result in an increase in root biomass and litter decomposition which brought a significantly change on active organic carbon content in surface soil aggregates.

Key Words: nitrogen deposition; surface soil aggregate; labile organic carbon; *Pinus tabulaeformis* forest

日益增加的氮(N)沉降已经对森林生态系统碳循环产生了重要影响[1]。Magnani 等[2]通过对多年碳通量数据进行系统分析，证实氮沉降可显著提高森林生态系统碳库。土壤有机碳库是森林生态系统碳库的重要组成部分[3]。由于土壤碳库基数巨大，通常整个碳库的微小变化很难被发现[4]。因此有研究将土壤有机碳分为易氧化有机碳和稳定或难分解有机碳两部分[5]，并指出土壤有机碳的短期变化主要发生在易氧化有机碳部分,其对周围环境的变化可迅速做出响应[6]。$KMnO_4$能够氧化糖类、有机酸类等简单化合物,也能氧化部分复杂化合物,如腐殖质[7]。Logninow 等[8]模拟有机碳被微生物、酶等的氧化分解作用,将易氧化有机碳能被 3 种不同浓度的 $KMnO_4$(33、167、333 mmol/L)氧化的数量,分为高活性、中活性、低活性 3 种活性有机碳组分。按此分类方法,高活性有机碳包括微生物碳、可矿化碳、水溶性碳等,中活性和低活性有机碳包括颗粒有机碳、糖、脂类等,及部分复杂化合物[9]。

表土中近 90%的土壤有机碳位于团聚体内[10]。由于不同粒级团聚体的形成环境和胶结类型不同,导致其稳定性及内部物质组成等出现差异,进而导致活性有机碳的差异[11]。有研究表明,大团聚体较微团聚体含有更多的碳,新输入的有机碳首先出现在大团聚体中,所以大团聚体中的活性有机碳占优势;微团聚体中的有机碳大多是高度腐殖化的惰性组分,不易分解[12-14]。不同粒级团聚体中,不同活性有机碳含量反映了有机化合物的种类和氧化的难易程度。

目前关于 N 添加条件下土壤活性有机碳的研究,多以全土为研究对象[4,15-19],而对团聚体中不同活性有机碳影响的研究较少[20]。由于不同粒级团聚体的稳定性和内部物质存在差异,因此研究 N 添加对土壤团聚体不同活性有机碳的影响十分必要。此外,目前关于土壤活性有机碳影响因素的研究多集中在土壤理化性质,忽视了根系和凋落物的作用。因此综合研究土壤理化性质和植被因子对土壤团聚体不同活性有机碳含量的影响,有助于加深对影响土壤团聚体活性有机碳因素的认识。本研究以黄土高原人工油松林为研究对象,通过野外梯度 N 添加试验,研究表层土壤团聚体中不同活性有机碳含量对 N 添加响应的差异,研究结果将为预测未来 N 沉降增加背景下土壤有机碳库变化提供依据和参考。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验地位于陕西省宜川县铁龙湾林场。地处黄龙山林区东侧,地理坐标为 35°39′N,110°06′E。地貌为黄土梁状丘陵,海拔 860—1200 m,坡度为 20°—25°,年平均气温 9.7℃,无霜期 180 d,年均降水量 584.4 mm,7—

9 月份降水量占到年降水量的 60%以上。土壤为原生(山坡)或次生(沟谷)黄土,表层土壤容重为 1.1 g/cm^3。地带性植被是暖温带落叶阔叶林,松栎林为顶级群落,林下枯枝落叶层厚 3—5 cm。试验地油松林于 1966 年营造,面积为 600 hm^2。林下灌木主要有兴安胡枝子(*Lespedeza daurica*)、胡颓子(*Elaeagnus umb-ellata*)、黄刺玫(*Rosa xanthina*)、绣线菊(*Spiraea salicifolia*)、忍冬(*Lonicera japonica*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等;草本植物主要为披针苔草(*Carex lanceolata*)。

1.2 试验设计

已有研究表明,2010 年中国氮沉降量变化范围为 0.1—7.43 g N m^{-2} a^{-1},平均为 2.11 g N m^{-2} a^{-1},从 1980 年至 2010 年,中国总的氮沉降量平均每年以 0.041 g N m^{-2} a^{-1}的速率增加,并且这种趋势在未来数十年内还将持续下去[21-22]。因此本试验共设置 4 个处理,分别为对照(CK),低氮沉降量(N3),中氮沉降量(N6),高氮沉降量(N9)。年施氮量分别为 0、3、6、9 g N m^{-2} a^{-1},肥料选用尿素,每年 4、6、8、10 月分 4 次溶解于水中喷施。每个施 N 处理设 6 个样地,样地面积为 10 m×10 m,样地间隔为 5 m。自 2014 年 4 月份开始,将尿素溶解于 10 L 水中,采用喷雾器对林下土壤来回均匀喷施来模拟氮沉降,对照样方喷洒等量的水。每次施肥于雨前喷施,以尽量减少尿素挥发。采样前最后一次施氮时间为 2015 年 8 月份。于 2014 年 4 月份对样地进行了植被调查,取土壤样品,测定土壤 pH 值、有机碳、全磷、速效磷,测定结果见表 1。

表 1 人工油松林样地基本概况

Table 1 Basic characteristics of experimental forests

处理 Treatment	林分特征 Vegetation characteristics		土壤性质 Soil properties			
	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	pH	有机碳 Organic C/(g/kg)	全磷 Total P/(g/kg)	速效磷 Available P/(mg/kg)
CK	16.04±1.46a	16.43±0.47a	8.22±0.01a	11.88±0.53a	0.51±0.02a	2.79±0.17b
N3	15.79±1.92a	17.22±0.40a	8.19±0.02a	14.91±1.17a	0.53±0.01a	4.24±0.76ab
N6	15.96±1.71a	16.12±0.76a	8.18±0.02a	14.34±0.67a	0.52±0.01a	4.76±0.24a
N9	16.34±3.23a	17.67±0.69a	8.26±0.03a	12.90±0.81a	0.52±0.01a	4.14±0.38ab

N3:低氮添加 Low nitrogen addition;N6:中氮添加 Medium nitrogen addition;N9: 高氮添加 High nitrogen addition;不同小写字母表示不同施氮处理之间达显著差异水平(P<0.05)

1.3 样品采集

2015 年 9 月份,在每个样地中随机设 3 个样方,大小为 1 m×1 m。收集每个样方内的凋落物,烘干后(65℃,48 h)称重。在样方中挖取长×宽×高为 50 cm×50 cm×10 cm 的土体,挑出植物根系,并分为粗根(>2 mm)和细根(<2 mm),烘干后(65℃,48 h)称重。根据前人研究结果发现短期氮添加主要影响表层土壤理化性质[23-24],因此每个样方采集 1 个表层(0—10 cm)原状土壤,放入硬质铝盒中带回实验室。挑除可见的动植物残体,风干。一部分进行团聚体分级,一部分研磨过 100 目筛测定土壤有机碳,全氮,pH,全磷,速效磷;余下部分经前处理后用激光粒度仪测定土壤机械组成,将测试结果按照美国制分类标准划分为粘粒(<0.002 mm),粉粒(0.002—0.05 mm)和砂粒(0.05—2 mm)。

1.4 测定方法

土壤团聚体分级采用湿筛法[25]。取 100 g 过 8 mm 筛的风干土样,放在套有 250 um 和 53 um 的土壤筛上,在去离子水中浸泡 10 min。之后按照 3 cm 振幅,30 次/min,震荡 2 min。去除漂浮在水面上的杂质,用离心机将水中的土壤颗粒分离,从而得到大团聚体(>0.25 mm),微团聚体(0.053—0.25 mm),和粉-粘团聚体(<0.053 mm)。所有团聚体冲洗到铝盒中,于 65℃烘至恒重。有机碳(TOC)含量采用重铬酸钾氧化法测定;不同活性有机碳(LOC)采用高锰酸钾氧化法测定[26],并略作改进,具体方法如下:称取含 15—30 mg 碳的土壤样品于 50 mL 离心管中,加入 333、167、33 mmol/L 高锰酸钾溶液 25 mL,密封振荡 1 h,4000 r/min 离心 5 min,取少量上清液稀释 250 倍,然后将稀释液于 565 nm 波长处比色,利用 $KMnO_4$ 消耗量计算 3 种活性有机碳含量,记为 C_1、C_2、C_3。C_3 即为高活性有机碳,C_2—C_3 为中活性有机碳,C_1—C_2 为低活性有机碳。非活性有

机碳(NLOC)为 TOC 与 C_1 的差值。

1.5 结果计算与统计分析

各级团聚体的质量百分含量=该级团聚体质量/土壤样品总质量×100%

采用 SigmaPlot 12.5 制图和 SPSS 20 软件进行数据处理,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 检验比较不同氮处理下各参数间的差异($\alpha=0.05$),利用因子分析(Factor analysis)对土壤因子和植被因子进行主成分分析。

2 结果与分析

2.1 氮添加对表层土壤水稳性团聚体分布的影响

由表 2 可知,短期氮添加对土壤水稳性团聚体分布影响不显著($p>0.05$)。总体上,各处理土壤水稳性团聚体以大团聚体(>0.25 mm)为主,所占比例为 65.36%—73.65%;微团聚体(0.053—0.25 mm)次之,为 21.88%—28.49%;粉-粘团聚体(<0.053 mm)占比最低,不超过 6.16%。

表 2　氮添加对土壤水稳性团聚体不同粒级质量百分含量的影响

Table 2　Effects of nitrogen addition levels on composition of soil aggregates

处理 Treatment	团聚体粒级范围 The range of particle sizes of aggregates/%		
	>0.25 mm	0.053—0.25 mm	<0.053 mm
CK	65.36±7.63a	28.49±6.40a	6.16±1.98a
N3	68.78±7.99a	25.95±7.41a	5.28±0.72a
N6	73.65±5.05a	21.88±4.57a	4.48±0.90a
N9	72.76±7.82a	22.11±6.45a	5.14±1.48a

2.2 氮添加对表层土壤有机碳和团聚体有机碳含量的影响

图 1 表明,短期 N 添加对土壤有机碳影响显著($P<0.05$)。随着 N 添加水平增加,土壤有机碳含量总体上呈先增加后降低趋势,并在 N6 处理下达到最大。和 CK 相比,N3,N6,N9 处理土壤有机碳含量分别提高了 61.1%,74.4%,47.6%。此外,与样地有机碳本底值对比,CK 处理有机碳含量无显著变化,N3,N6,N9 处理分别提高了 4.76%,17.99%,10.93%。

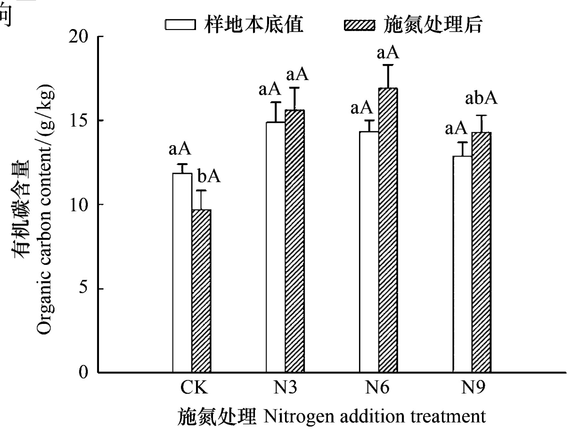


图 1　施 N 处理对土壤有机碳含量的影响

Fig.1　Effect of N addition on the content of soil organic carbon

不同小写字母表示不同处理之间达显著差异水平($P<0.05$),不同大写字母表示同一处理施肥前后之间差异达显著水平($P<0.05$)

由图 2 可知,同一处理大团聚体有机碳含量最高,微团聚体次之,粉-粘团聚体有机碳含量最低;随着 N 添加水平增加,大团聚体和微团聚体有机碳变化遵循土壤有机碳先升高后降低的变化规律,都在 N6 处理下含量最高。相比 CK 处理,各处理粉粘团聚体有机碳含量均显著增加($P<0.05$);N6 处理下不同粒级团聚体有机碳含量显著增加,大团聚体有机碳增幅为 56.85%、微团聚体有机碳增幅为 51.63%,N3、N9 处理与 CK 相比差异不显著。由此可以看出,这 3 种粒级团聚体有机碳对于 N 添加的响应有所差异。

2.3 氮添加对表层土壤团聚体不同活性有机碳和非活性有机碳含量的影响

如图 3 所示,同一处理下,大团聚体高活性有机碳含量最高,中活性有机碳次之,低活性有机碳含量最低。随着 N 水平增加,大团聚体低活性有机碳含量逐渐增加,中活性和高活性有机碳含量总体上呈先增加后降低趋势,并在 N6 处理下达到最大。相比 CK 处理,各处理大团聚体低活性有机碳含量分别增加 86.67%、

115.06%、144.60%,中活性有机碳含量增加 104.22%、178.73%、148.65%,高活性有机碳含量增加 72.54%、79.61%、73.63%。如图 4 所示,同一处理下微团聚体高活性有机碳含量最高,中活性有机碳次之,低活性有机碳最低。随着 N 水平增加,微团聚体低活性有机碳含量变化规律不明显,中活性和高活性有机碳含量总体上呈先增加后降低趋势,并在 N6 处理下达到最大。相比 CK 处理,施 N 处理微团聚体高活性有机碳含量均显著增加(P<0.05),中活性有机碳含量增幅最大:微团聚体低活性有机碳含量增加 65.69%、32.84%、64.46%,中活性有机碳含量增加 115.02%、166.79%、59.18%,高活性有机碳含量增加 59.35%、62.05%、46.94%。大、微团聚体中活性有机碳含量增幅最大,表明团聚体中活性有机碳对 N 添加响应最为明显。通过比较发现大团聚体和微团聚体变化规律类似,都表现为活性有机碳含量按高、中、低活性碳递减,且对 N6 处理响应更敏感;差异在于大团聚体低活性有机碳对施 N 处理的响应比微团聚体低活性有机碳更为敏感。

图 5 表明,同一处理下,大团聚体非活性有机碳含量大于微团聚体,随着 N 水平增加,大团聚体和微团聚体非活性有机碳含量呈先增加后降低趋势,但之间并无显著性差异(P>0.05)。说明近两年的施 N 试验主要影响活性有机碳,对非活性有机碳影响不显著。

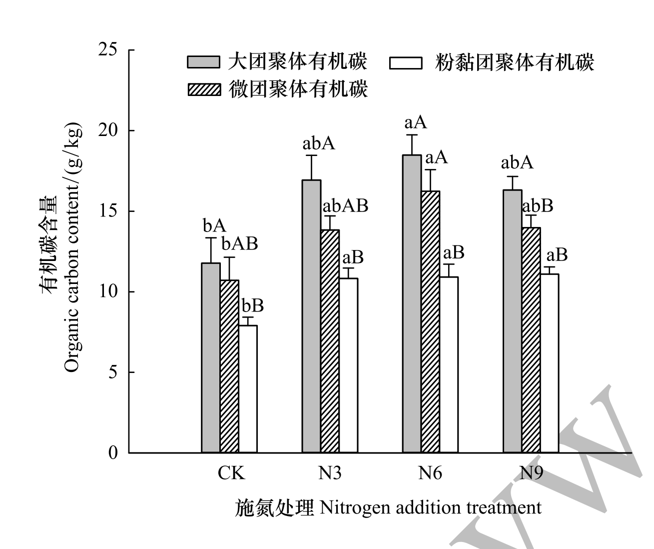


图 2 施 N 处理对土壤团聚体有机碳含量的影响

Fig. 2 Effect of N addition on the content of soil aggregates organic carbon

不同小写字母表示同一粒级不同处理之间达显著差异水平(P<0.05),不同大写字母表示同一处理各粒级之间差异达显著水平(P<0.05)

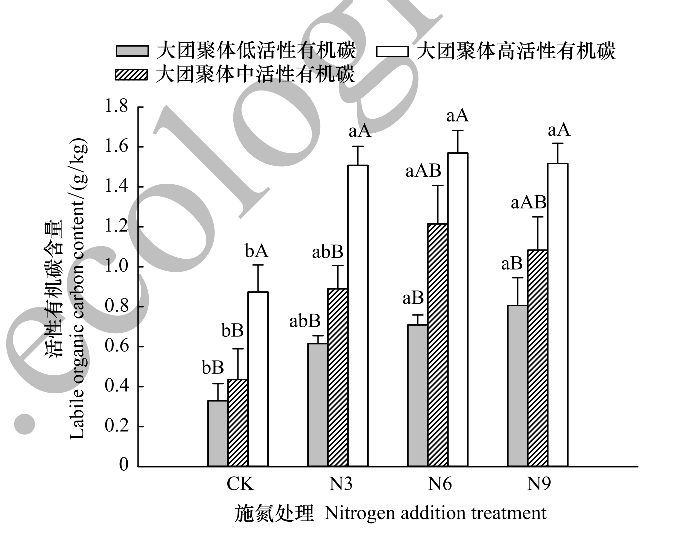


图 3 施 N 处理下土壤大团聚体低、中、高活性有机碳含量

Fig.3 Content of minimally, moderately, highly labile organic carbon in soil macro-aggregates under different nitrogen addition

不同小写字母表示同一活性碳不同处理之间达显著差异水平(P<0.05),不同大写字母表示同一处理不同活性碳之间差异达显著水平(P<0.05)

2.4 影响表层土壤团聚体活性有机碳因子的主成分分析

土壤活性有机碳受到土壤理化性质、生物因素的共同作用。氮添加会改变森林生态系统 C:N:P 化学计量比和降低土壤 pH 值,影响凋落物分解、细根周转、土壤呼吸等,进而影响到土壤碳库。各因子间不可避免地存在多重共线性,为了明确各因子的影响程度,对影响土壤团聚体活性有机碳的 3 个植被因子和 7 个土壤因子进行主成分分析(表 3)。结果表明,所有主成分中特征值>1 的有 3 个,其方差累计贡献率为 77.16%。主成分 1 与有机碳、全磷、全 N、砂粒显著正相关,与 pH、粘粒显著负相关,这反映了土壤理化性质的内在关系:N 添加引起的土壤全 N、pH 变化引起了土壤其它性质的改变,故主成分 1 可称为土壤理化性质成分;主成分 2 与粗根生物量、砂粒显著正相关,与粉粒显著负相关,故主成分 2 可称为土壤-植被共同作用成分;主成分 3 与细根生物量显著正相关,与凋落物生物量显著负相关,表明细根生物量与凋落物分解都有助于活性有机碳增加,因此主成分 3 称为植被因子成分。以上可以看出,施 N 引起的土壤理化性质变化是土壤活性有机碳变化的主要原因。

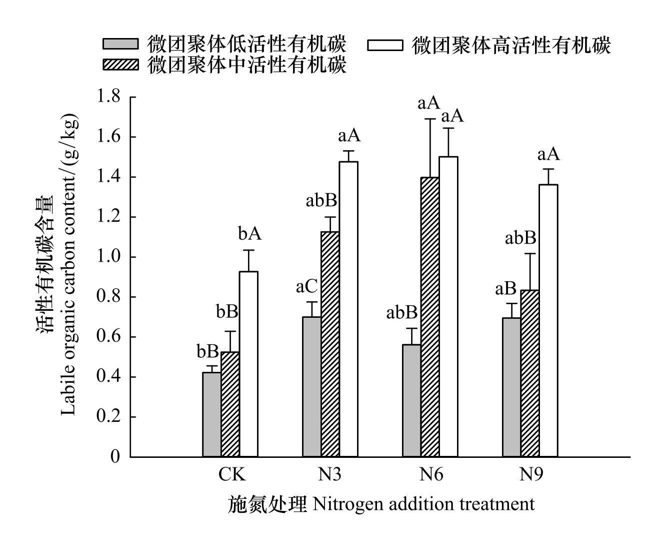


图 4　施 N 处理下土壤微团聚体低、中、高活性有机碳含量

Fig.4　Content of minimally, moderately, highly labile organic carbon in soil micro-aggregates under different nitrogen addition

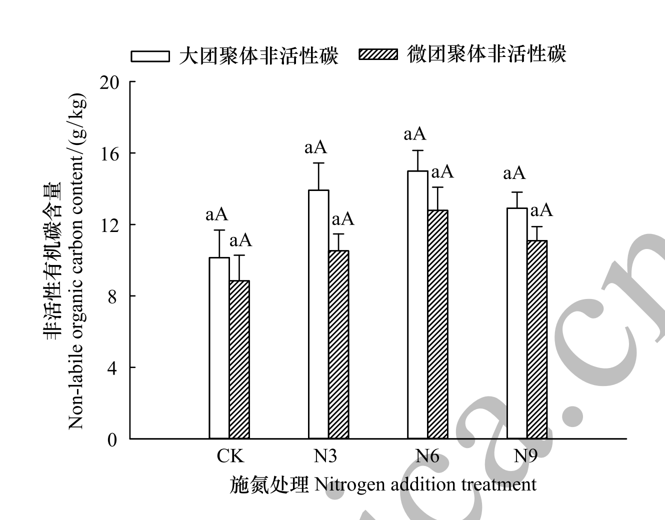


图 5　施 N 处理下土壤大、微团聚体非活性有机碳含量

Fig.5　Content of non-labile organic carbon in soil aggregates under different nitrogen addition

不同小写字母表示同一粒级不同处理之间达显著差异水平(P<0.05),不同大写字母表示同一处理各粒级之间差异达显著水平(P<0.05)

表 3　因子载荷阵及贡献率

Table 3　Principal component loading matrix and contribution rate

因子 Factor	主成分 Component 1	2	3	因子 Factor	主成分 Component 1	2	3
有机碳 Organic carbon	0.861*	−0.107	−0.262	凋落物生物量 Litter biomass	−0.487	0.143	−0.784*
pH	−0.859*	0.276	0.053	粘粒 Clay	−0.809*	0.044	0.124
全磷 Total P	0.700*	0.351	0.071	粉粒 Silt	0.034	−0.906*	−0.171
全氮 Total N	0.947*	−0.043	−0.045	砂粒 Sand	0.628*	0.700*	0.039
粗根生物量 Rough root biomass	−0.327	0.512*	0.224	贡献率 Contribution rate/%	42.62	18.96	15.58
细根生物量 Fine root biomass	0.042	−0.296	0.877*	累计贡献率 Accumulative contribution rate/%	42.62	61.57	77.16

* 因子与主成分显著相关(P<0.05)

3　讨论

本研究经过近 2 年的 N 添加试验发现,施 N 对黄土高原人工油松林表层(0—10 cm)土壤有机碳影响显著。其中,适量 N 添加(3、6 g N m^{-2} a^{-1})对表层土壤有机碳含量有显著的促进作用,而高 N 添加(9 g N m^{-2} a^{-1})促进作用并不明显,表明土壤有机碳对 N 添加的响应不是线性的,可能存在饱和点。N 添加对土壤有机碳的影响依赖于净初级生产所带来的碳输入与分解矿化引起的碳输出之间的平衡[27]。黄土高原属于受 N 限制的地区[28]。N 输入的增加会刺激植物生长,但高的 N 沉降速率会造成 N 刺激,使油松林处于由 N 缺乏向 N 饱和的阶段转变,这一阶段 N 吸持效率会逐步降低[21]。过高的 N 沉降速率使得植物生长量减少[29],同时也减少了植物根系及其分泌物向土壤的碳归还[24],导致高氮添加促进作用不明显甚至产生毒害。因此 6 g N m^{-2} a^{-1}可能是适宜本地区人工油松林的氮添加量。

本研究发现,短期施 N 对表层土壤团聚体分布并无显著影响,各处理以大团聚体有机碳含量最高,与安韶山等[30]的研究结果类似。从团聚体胶结物质角度考虑,微团聚体被腐殖质等稳定,而大团聚体是由微团聚体进一步团聚形成的,除原有有机质外,主要是被新输入的有机质(如碳水化合物、根系分泌物、菌丝)所稳

定[12]。随着 N 添加水平增加,大团聚体和微团聚体有机碳变化遵循土壤有机碳先升高后降低的变化规律,均在 N6 处理下含量最高,这表明大团聚体和微团聚体有机碳与土壤有机碳有一定的相关性。

土壤有机碳的短暂波动主要发生在活性有机碳部分[6]。活性有机碳主要包括微生物碳、水溶性碳,以及糖类、有机酸类等简单易变有机物和少量复杂有机物,其来源主要包括凋落物分解、根系分泌物及脱落物、微生物代谢产物[31],其含量对气候变化响应较为敏感。本研究发现短期 N 添加显著增加了团聚体有机碳含量和 3 种活性有机碳含量,而对团聚体非活性有机碳含量无显著影响。说明施 N 主要通过影响活性有机碳进而改变团聚体及土壤有机碳含量,继而验证了前人的研究结论。本研究中,同一处理下土壤大、微团聚体活性有机碳含量都表现为高活性有机碳>中活性有机碳>低活性有机碳,说明本地区活性有机碳组分以高活性有机碳有主。然而大、微团聚体中活性有机碳含量增幅最大,表明团聚体中活性有机碳对 N 添加响应最为敏感。由于土壤活性有机碳的复杂性,导致目前研究对于 N 添加如何影响活性有机碳机制的认识尚存在不足。前人研究表明,低 N 添加会通过影响土壤环境促进凋落物分解和根系分泌物输入而产生更多的可溶性糖等简单化合物[32]。主成分分析表明,N 添加引起的土壤全 N、pH 变化引起了土壤其它性质的改变,进而导致根系生物量增加并促进凋落物分解。这可能是团聚体中活性有机碳有明显变化的主要原因。

本研究发现,除团聚体低活性有机碳外,中、高活性有机碳含量都表现出随施 N 梯度先增加后减小的规律,在 N6 水平达到最高。团聚体中、高活性有机碳,团聚体有机碳和土壤有机碳变化规律类似,说明团聚体有机碳及土壤有机碳与团聚体中、高活性有机碳关系密切,这与大多数研究结果一致[33-34]。而中、高活性有机碳在大团聚体和微团聚体中的分布没有明显差异,这与前人的研究结果不同。华娟等[33]在宁夏云雾山草原地区的研究发现,植被恢复主要影响大团聚体活性有机碳。李睿等[34]也得出类似的结论。而王彩霞等[35]发现各粒级团聚体中活性有机碳含量随粒级增大而降低。可见活性有机碳在不同粒级团聚体中的分布是一个复杂的过程,不同地区土壤母质、植被条件和生态环境,以及团聚体分离方法的差异,可能是导致研究结果差异的主要原因。

4 结论

(1)短期 N 添加对表层土壤和大、微团聚体中有机碳和活性有机碳含量有着显著影响,其中 N6 处理(6 g N m^{-2} a^{-1})响应最为明显。

(2)施 N 处理不同程度地增加了表层土壤大团聚体和微团聚体 3 种活性有机碳含量,而对团聚体非活性有机碳含量无显著影响。说明施 N 主要通过影响活性有机碳进而改变有机碳含量。同一施 N 处理下,土壤大、微团聚体活性有机碳含量都表现为高活性有机碳>中活性有机碳>低活性有机碳,活性有机碳组分以高活性有机碳有主。而大、微团聚体中活性有机碳含量增幅最大,表明团聚体中活性有机碳对 N 添加响应最为明显。氮添加通过影响大、微团聚体中的中活性有机碳进而影响土壤表层有机碳含量。

(3)主成分分析表明,N 添加引起的土壤理化性质的改变,进而导致根系生物量增加并促进凋落物分解,是表层土壤团聚体活性有机碳变化的主要原因。至于 N 添加具体通过影响土壤哪些有机物导致团聚体活性有机碳增加,有待深入研究。

参考文献(References):

[1] 许凯, 徐钰, 张梦珊, 徐长柏, 曹国华, 葛之葳, 阮宏华. 氮添加对苏北沿海杨树人工林土壤活性有机碳库的影响. 生态学杂志, 2014, 33(6): 1480-1486.

[2] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M, Berbigier P, Berninger F, Delzon S, Grelle A, Hari P, Jarvis P G, Kolari P, Kowalski A S, Lankreijer H, Law B E, Lindroth A, Loustau D, Manca G, Moncrieff J B, Rayment M, Tedeschi V, Valentini R, Grace J. The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests. Nature, 2007, 447(7146): 849-851.

[3] 曹丛丛, 齐玉春, 董云社, 彭琴, 刘欣超, 孙良杰, 贾军强, 郭树芳, 闫钟清. 氮沉降对陆地生态系统关键有机碳组分的影响. 草业学报, 2014, 23(2): 323-332.

[4] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 李仁洪, 何远洋, 田祥宇, 肖银龙, 景建飞. 模拟氮沉降对华西雨屏区慈竹林土壤活性有机碳库和根生物量的影

响. 生态学报, 2010, 30(9): 2286-2294.

[5] 王琳, 李玲玲, 高立峰, 刘杰, 罗珠珠, 谢军红. 长期保护性耕作对黄绵土总有机碳和易氧化有机碳动态的影响. 中国生态农业学报, 2013, 21(9): 1057-1063.

[6] Biederbeck V O, Janzen H H, Campbell C A, Zentner R P. Labile soil organic-matter as influenced by cropping practices in an arid environment. Soil Biology and Biochemistry, 1994, 26(12):1647-1656.

[7] Tirol-Padre A, Ladha J K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(3): 969-978.

[8] Loginow W, Wisniewski W, Gonet S S, Ciescinska B. Fractionation of organic carbon based on susceptibility to oxidation. Polish Journal of Soil Science, 1987, 20(1): 47-52.

[9] 何翠翠. 长期不同施肥措施对黑土土壤碳库及其酶活性的影响研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.

[10] Jastrow J D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. Soil Biology and Biochemistry, 1996, 28(4/5): 665-676.

[11] Adesodun J K, Adeyemi E F, Oyegoke C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 190-197.

[12] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. European Journal of Soil Science, 2000, 51(4): 595-605.

[13] Elliott E T, Cambardella C A. Physical separation of soil organic matter. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1991, 34(1/4): 407-419.

[14] 窦森, 郝翔翔. 黑土团聚体与颗粒中碳、氮含量及腐殖质组成的比较. 中国农业科学, 2013, 46(5): 970-977.

[15] 龙凤玲, 李义勇, 方熊, 黄文娟, 刘双娥, 刘菊秀. 大气 CO_2 浓度上升和氮添加对南亚热带模拟森林生态系统土壤碳稳定性的影响. 植物生态学报, 2014, 38(10): 1053-1063.

[16] 方熊, 刘菊秀, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 赵亮. 降水变化、氮添加对鼎湖山主要森林土壤有机碳矿化和土壤微生物碳的影响. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 531-538.

[17] 涂玉, 尤业明, 孙建新. 油松-辽东栎混交林地表凋落物与氮添加对土壤微生物生物量碳、氮及其活性的影响. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2325-2331.

[18] 祁瑜, Mulder J, 段雷, 黄永梅. 模拟氮沉降对克氏针茅草原土壤有机碳的短期影响. 生态学报, 2015, 35(4): 1104-1113.

[19] 窦晶鑫, 刘景双, 王洋, 赵光影. 模拟氮沉降对湿地植物生物量与土壤活性碳库的影响. 应用生态学报, 2008, 19(8): 1714-1720.

[20] Tripathi S K, Kushwaha C P, Singh K P. Tropical forest and savanna ecosystems show differential impact of N and P additions on soil organic matter and aggregate structure. Global Change Biology, 2008, 14(11): 2572-2581.

[21] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 叶永昌, 刘颂颂, 徐国良, 倪杰. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(5): 1422-1433.

[22] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, 112(D22): D22S05.

[23] 郭依秋, 范秀华, 汪金松, 金冠一. 太岳山油松林土壤微生物量对模拟氮沉降的响应. 应用与环境生物学报, 2013, 19(4): 605-610.

[24] 齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛. 温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应. 环境科学, 2014, 35(8): 3073-3082.

[25] Xiang H M, Zhang L L, Wen D Z. Change of soil carbon fractions and water-stable aggregates in a forest ecosystem succession in South China. Forests, 2015, 6(8): 2703-2718.

[26] 安娟娟, 陈少锋, 赵发珠, 杨丽霞, 韩新辉, 康迪, 杨改河. 不同人工植被下土壤活性有机碳及碳库管理指数变化. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 985-991.

[27] 李嵘, 常瑞英. 土壤有机碳对外源氮添加的响应及其机制. 植物生态学报, 2015, 39(10): 1012-1020.

[28] 邹亚丽, 牛得草, 杨益, 文海燕, 傅华. 氮素添加对黄土高原典型草原土壤氮矿化的影响. 草地学报, 2014, 22(3): 461-468.

[29] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, Lehman S J, Turnbull J, Bowman W D. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. Nature, 2002, 419(6910): 915-917.

[30] 安韶山, 张玄, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区植被恢复中不同粒级土壤团聚体有机碳分布特征. 水土保持学报, 2007, 21(6): 109-113.

[31] Leith I D, Hicks W K, Fowler D, Woodin S J. Differential responses of UK upland plants to nitrogen deposition. New Phytologist, 1999, 141(2): 277-289.

[32] 高艳, 马红亮, 高人, 尹云锋, 陈仕东, 章伟, 朱祥妹, 杨玉盛. 模拟氮沉降对森林土壤酚类物质和可溶性糖含量的影响. 土壤, 2014, 46(1): 41-46.

[33] 华娟, 赵世伟, 张扬, 马帅. 云雾山草原区不同植被恢复阶段土壤团聚体活性有机碳分布特征. 生态学报, 2009, 29(9): 4613-4619.

[34] 李睿, 江长胜, 郝庆菊. 缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征. 环境科学, 2015, 36(9): 3429-3437.

[35] 王彩霞, 王旭东, 朱瑞祥. 保护性耕作对土壤结构体有机碳氧化稳定性的影响. 中国农学通报, 2010, 26(5): 121-126.